



Ilmastonmuutoksen ja maatalouden vaikutukset virtavesiin

Camilla Reinikainen

LuK-tutkielma

Biologian tutkinto-ohjelma, ekologia

Oulun yliopisto

Joulukuu 2020

Tiivistelmä

Tässä kandidaatin tutkielmassa on ollut tarkoitus selvittää, mitä vaikutuksia ilmastonmuutoksella ja maataloudella on virtavesistöihin. Lämpötila vaikuttaa kaikkien ekosysteemien toimintaan ja on yksi merkittävimmistä tekijöistä, jotka määrittävät elinympäristöjen ekosysteemiprosesseja sekä eliöyhteisön rakennetta. Maatalouden aiheuttama eroosion lisääntyminen lisää ravinteiden ja hienon sedimentin määrää virtavesistöissä, mikä heikentää virtavesistöjen elinvoimaisuutta. Tarkastelen tutkielmassa, miten nämä kaksi ympäristöä määrittelevää tekijää vaikuttavat ja mitä niiden yhteisvaikutus aiheuttaa virtavesiekosysteemeille.

Maatalouden vaikutuksesta alkuperäinen kasvillisuus raivataan peltoalueiksi, mikä lisää maaperän eroosiota. Virtavesistöihin pääsee tällöin kulkeutumaan enemmän ravinteita, hienoja sedimenttejä, maataloudessa käytettäviä kemikaaleja ja torjunta-aineita sekä jättevettä. Nämä tekijät heikentävät virtavesiekosysteemien elinvoimaisuutta ja siellä elävien eliöiden, kuten pohjaeläinten, biologista monimuotoisuutta. Etenkin hienon sedimentin määrän lisääntyminen virtavesissä aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia pohjaeläinten eliöyhteisön rakenteeseen.

Antropogeenisen ilmastonmuutoksen aiheuttama lämpötilan nousu vaikuttaa virtavesiekosysteemien toimintaan. Virtavesistöjen hydrologia ja pohjaeläinten taksonien runsaus ovat hyvin riippuvaisia vesistön lämpötilaolosuhteista. Lämpenevä ilmasto vaikuttaa esimerkiksi sademääriin, lumen ja jään peittävyYTEEN sekä sulamisnopeuteen, ja tämän vuoksi koko virtavesistön hydrologiaan ja virtaaman voimakkuuteen. Lämpenevän ilmaston vuoksi sateet muuttuvat talvisin enemmän vedeksi ja niiden on ennustettu myös lisääntyvän ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Tämän vuoksi lumi ja jää sulavat todennäköisesti aikaisemmin ja nopeammin, mikä muuttaa tiettyihin virtaamaolosuhteisiin sopeutuneiden pohjaeläinten eliöyhteisöjen rakennetta.

Lämpötilan kohoaminen pahentaa maataloudesta aiheutuvien stressitekijöiden eli ravinteiden ja hienon sedimentin aiheuttaman kuormituksen vaikutuksia, ja näiden tekijöiden yhteisvaikutus aiheuttaa moninkertaista kuormitusta virtavesien pohjaeläimille. Stressitekijöiden vaikutusten kumuloituminen vähentää virtavesiekosysteemien biologista monimuotoisuutta ja elinvoimaisuutta enemmän kuin yksittäiset stressitekijät.

Avainsanat: virtavesi, ilmastonmuutos, maatalous, ravinteet, hieno sedimentti

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	4
2. Maatalouden ravinnekuormitus ja sen vaikutukset virtavesiin.....	6
2.1 Ravinteet ja hieno sedimentti	6
2.2 Ravinteiden määrän lisääntymisen ja hienon sedimentin vaikutukset virtavesiin	8
3. Ilmaston lämpeneminen ja sen vaikutukset virtavesiin	10
3.1 Ilmaston lämpeneminen.....	10
3.2 Veden lämpötilan nousun vaikutus virtavesien hydrologiaan ja yhteisörakenteeseen...	11
4. Ilmastonmuutoksen ja maatalouden yhteisvaikutus	13
4.1 Lämpötilan nousun, ravinteiden rikastumisen ja hienon sedimentin yhteisvaikutus virtavesiin	13
4.2 Tutkimukset ilmastonmuutoksen ja maatalouden vaikutuksista virtavesiin	14
5. Pohdinta.....	16
Lähteet	18

1. Johdanto

Makean veden ekosysteemit peittävät alle prosentin maapallon pinta-alasta, mutta niissä elää yli 100 000 eri eläinlajia, mukaan lukien 10 000 makean veden kalalajia ja 90 000 selkärangatonlajia. Virtaavat vedet ovat dynaamisia systeemejä ekologisesti ja geomorfologisesti. Maantieteelliset ja ilmastolliset vaihtelut vaikuttavat perustavanlaatuisesti virtavesien biologiseen toimintaan. Monet virtavedet ovat uhattuna erilaisten ihmistoimintojen ja ilmastollisten muutoksien vuoksi. Maankäytössä tapahtuneet muutokset, kuten maanviljelyn ja urbanisaation voimistuminen, aiheuttavat muutoksia muun muassa virtavesien hydrologiassa sedimenttien määrässä ja lämpötilassa (Allan & Castillo, 2007).

Makean veden ekosysteemit tarjoavat elintärkeitä resursseja ihmisille muodostaen lisäksi poikkeuksellisen rikkaan ja endeemisen, mutta myös haavoittuaisen eliöstön (Wagenhoff et al., 2012). Ihmiset ovat käyttäneet makean veden ympäristöjä jo hyvin pitkään esimerkiksi juoma- ja kasteluveden lähteenä, minkä lisäksi veden virtausenergiaa hyödynnetään sähköntuotannossa (Strayer & Dudgeon, 2010). Virtavedet ovat myös mahdollistaneet erilaisia elinkeinoja, kuten kalastuksen ja metsästämisen. Makean veden väheneminen, rehevöityminen ja kuivuminen sekä vesistöjen monimuotoisuuden heikkeneminen ovat yksi suurimmista tämänhetkisistä huolenaiheista maailmanlaajuisesti (Strayer & Dudgeon, 2010). Tutkimuksissa on todettu, että makean veden ympäristöt ovat erityisen haavoittuvaisia ilmastomuutoksen vaikutuksille (Barbour et al., 2010; Moore et al., 1997; Ryan & Ryan, 2006; Wrona et al., 2006)

Antropogeenisestä ilmastomuutoksesta johtuva ilmaston lämpeneminen sekä erilaiset ihmisten kehittämät maankäyttötavat aiheuttavat laajamittaisia muutoksia jokien monimuotoisuuteen (Brown et al., 2019). Jokien ja purojen kuntoa määritetään maailmanlaajuisesti esimerkiksi virtavesissä elävien pohjaeläinyhteisöjen runsauden ja rakenteen perusteella (Matthaei et al., 2010; Piggott et al., 2012; Townsend et al., 2008; Wagenhoff et al., 2011, 2012). Maatalous lisää maaperän eroosiota ja täten veteen liukenevan hienon sedimentin ja ravinteiden määrää (Piggott et al., 2015), mikä aiheuttaa moniulotteisia vaikutuksia virtavesien elinympäristöön ja siellä elävien pohjaeläinten eliöyhteisön koostumukseen. Maatalouden aiheuttama ravinnekuormitus ja ilmaston lämpenemisen aiheuttama vesistöjen lämpeneminen sekä sademäärissä tapahtuvat muutokset määrittelevät

paljolti jokien ja purojen tilaa (Piggott et al., 2015). Veden liian suuren ravinnepitoisuuden ja ilmaston lämpenemisen yhteisvaikutus huonontaa veden laatua (Piggott et al., 2015)

Virtaavien vesien ympäristöt ovat monimuotoisia ja vaihtelevia. Monet tekijät vaikuttavat veden kemialliseen koostumukseen aiheuttaen vaihtelua jokien välillä. Esimerkiksi joillakin alueilla vesi on kirkasta, joillakin taas sameaa johtuen veteen liuenneista suurista orgaanisen aineksen pitoisuuksista. Sadevesi on yksi kemiallisten aineosien lähde, mutta suurin osa joista ja puroista sisältää paljon enemmän veteen liuenneita aineita kuin mitä sadevesi yksinomaan sisältää. Ympäristön maaperä ja sen maankäyttö vaikuttavatkin vahvasti jokeen liuenneiden aineiden pitoisuuksiin (Allan & Castillo, 2007).

2. Maatalouden ravinnekuormitus ja sen vaikutukset virtavesiin

2.1 Ravinteet ja hieno sedimentti

Ravinteet ovat elämälle välttämättömiä ja ne määräävät biologisen ekosysteemin tuottavuutta. Elävien organismien ainesosia käytetään jatkuvasti uudelleen ja ainesosat kiertävät ekosysteemissä ravinteiden kierrossa. Vedessä heterotrofit saavat suurimman osan ravinteistaan syömänsä ravinnon kautta tai suoraan vedestä. Ravinteet rajoittavat enemmän autotrofien, sienten ja bakteerien toimintaa. Yleensä heterotrofeja rajoittaa orgaanisen hiilen saanti ravinteiden sijaan (Allan & Castillo, 2007).

Eniten käytettyjä epäorgaanisia ainesosia kutsutaan makroravinteiksi, joita ovat typpi (N), fosfori (P), kalium (K), kalsium (Ca), rikki (S) ja magnesium (Mg), joita eliöt tarvitsevat elintoimintoihinsa. Autotrofit saavat ravinteita suoraan elinympäristöstään ja heterotrofit syömänsä ravinnon kautta. Muita vähemmän tarvittavia ainesosia kutsutaan hivenaineiksi (Allan & Castillo, 2007). Typeä tarvitaan eliöiden proteiinisynteesiin ja fosforia DNA:n ja RNA:n valmistukseen sekä energian kuljetukseen. Sekä typeä että fosforia tarvitaan tukemaan esimerkiksi vesikasvien kasvua ja ne ovat tärkeimpiä ravintoaineita useimmissa maa- ja vesiekosysteemeissä (Conley et al., 2009). Typen saatavuus on kuitenkin lisääntynyt hallitsemattomasti lannoitteiden valmistuksen ja fossiilisten polttoaineiden päästöjen lisääntymisen vuoksi. Fosforin pitoisuudet vedessä ovat myös lisääntyneet merkittävästi lannoitteiden käytön ja vesistöön joutuvien jätevesien vuoksi (Conley et al., 2009).

Maatalous vaikuttaa virtavesiin maailmanlaajuisesti muun muassa ravinteiden rikastumisen ja hienojen sedimenttien määrän kasvamisen kautta (Piggott et al., 2015). Ravinnekuormitus on merkittävä uhka virtavesiekosysteemeille aiheuttaen muutoksia veden biologisessa monimuotoisuudessa ja biogeokemiallisissa prosesseissa (Woodward et al., 2012). Ravinnekuormituksen aiheuttama rehevöityminen lisää vesistön perustuotantoa ja biologista aktiivisuutta, mikä puolestaan lisää vesistössä tapahtuvaa hajotustoimintaa, jolloin hapen kulutus kasvaa huomattavasti (Smith et al., 2006). Tämä taas johtaa tyypillisesti dramaattisiin muutoksiin vedessä olevien ravintoverkkojen koostumukseen ja rakenteeseen (Smith et al., 2006). Hieno sedimentti on vesistön pohjaan kerääntynyttä maa-ainesta, jota pääsee vesistöihin eroosion ja maa-aineksen valunnan myötä. Maatalous lisää eroosiota ja näin ollen sedimentin määrää vedessä, millä on merkitystä koko vesistön ja sen eliöyhteisön toiminnalle (Piggott et al., 2015).

Virtavesistöihin valuu maatalousalueilta erilaisia maatalouskemikaaleja, kuten torjunta-aineita ja lannoitteita, sekä jätevetä ja muita epäpuhtauksia (Feld et al., 2011; Friberg et al., 2011; Mulder et al., 2011). Maatalousalueiden rakentaminen hävittää alkuperäisen kasvillisuuden ja puuston, joiden tilalle muodostuu avara peltoalue. Puuston puuttuminen lisää maaperän eroosiota ja pellolta tulevien kemikaalien ja ravinteiden valuntaa vesistöihin (Hladyz et al., 2011). Hladyz ym. (2011) osoittivat, että erilaiset kasvillisuustyyppit jokien varsilla vaikuttavat levämässän ja kuolleiden kasvien hajoamistuotteen eli detrituksen määrään vedessä. Vesistössä elävät pohjaeläimet käyttävät detritusta ravintonaan ja joet tyypillisesti vastaanottavat orgaanista ainesta joen yläjuoksulta, riippuen siellä olevasta kasvillisuudesta (Allan & Castillo, 2007). Mikäli jokeen pudonneita lehtiä on niukasti ympäristöön rakennettujen peltoalueiden vuoksi, on eliöiden ravinto vähissä. Tämä vaikuttaa ravintoverkon jokaiseen osa-alueeseen ja köyhdyttää joessa olevaa pohjaeliöstön rakennetta (Hladyz et al., 2011). Jokia on myös kanavoitu, syvennetty ja suoristettu esimerkiksi maankuivausta tai tavarankuljettamista varten (Hladyz et al., 2011). Viime vuosina veden laatua on yritetty parantaa kehittämällä jokien pilaantumista koskevaa lainsäädäntöä, valuma-alueiden hallintojärjestelmiä sekä jokien palauttamisohjelmia (Feld et al., 2011; Friberg et al., 2011).

Perustuotannon noustessa ravinteiden määrän nousu voi olla aluksi hyödyllistä vesistössä eläville lajeille. Tietyn ravinnepitoisuusmäärän ylittyessä levämässän osuus vedessä kasvaa liialliseksi ja eutrofiset eli rehevän ja ravinnerikkaan elinympäristön lajit muuttuvat vallitseviksi, mikä muuttaa vesistön eliörakennetta (Niyogi et al., 2007; Wagenhoff et al., 2012). Elinympäristön huonontuminen ilmenee pohjaeläinten muuttuneissa elinolosuhteissa sekä virtauksessa tapahtuvissa muutoksissa, esimerkiksi virtaveden koski- ja suvantokohdissa (Allan & Castillo, 2007). Ravinteiden määrän kasvu vedessä aiheuttaa autotrofien määrän lisääntymistä, mikä kasvattaa vesistön perustuotantoa ja aiheuttaa muutoksia eliöiden esiintymisessä. Ravinteiden määrän lisääntyessä levämässat kasvavat ja etenkin auringonvalon aiheuttaman lämpötilannousun myötä hajoamisnopeus kiihtyy, mikä voi vähentää veteen liuenneen hapen määrää entisestään. Tämän seurauksena vaativampien olosuhteiden lajit väistyvät ja nopeasti uusiin olosuhteisiin sopeutuvat lajit, usein vieraslajit, yleistyvät (Allan & Castillo, 2007).

2.2 Ravinteiden määrän lisääntymisen ja hienon sedimentin vaikutukset virtavesiin

Maankäytöstä johtuvat muutokset virtavesiä ympäröivillä alueilla heikentävät virtavesistöjen tilaa ympäri maailman (Allan & Castillo, 2007). Kaupungeista ja maatalousalueilta kulkeutuvat valumat ovat ensisijaisia epäpuhtauksien aiheuttajia vesistöissä kuljettaen sedimenttejä, ravinteita sekä rikkakasvien torjunta-aineita ja muita maataloudessa käytettäviä vesistölle haitallisia aineita. Maatalouden valumat aiheuttavat fosforin ja typen liiallisia pitoisuuksia vesistöissä.

Monien tutkimusten mukaan maankäytöllä ja muulla ihmisen toiminnalla on negatiivisia vaikutuksia virtavesiekosysteemien lajirunsauteen ja elinvoimaisuuteen (Allan & Castillo, 2007). Maataloudesta johtuvat liialliset ravinnepestöt ovat yksi merkittävimmistä uhkatekijöistä virtavesien elinvoimaisuudelle sekä normaalille toiminnalle. Makean veden ekosysteemien ravinnepestöt ovat yleisiä ja vaikuttavat voimakkaasti hiilen kiertoon. Ylimääräiset ravintoaineet kiihdyttävät hiilirikkaan leväbiomassan tuotantoa, mutta toisaalta voivat myös kiihdyttää samalla hiilikatoa vesistöissä, sillä ylimääräiset ravintoaineet lisäävät orgaanisen hiilen mineralisaatiota, mikä vapauttaa veteen hiilidioksidia (Finlay et al., 2013; Woodward et al., 2012). Hiilen mineralisaatio ja veden hiilidioksidipitoisuuden kasvaminen huonontavat eliöiden hiilen saatavuutta vesiekosysteemeissä, mikä vaikuttaa negatiivisesti koko elinympäristön toimintaan.

Wagenhoff ym. (2012) manipuloivat virtavesistöissä elävien pohjaeläinten elinympäristöä lisäämällä ravinteiden ja sedimenttien määrää vesistössä, millä pyrittiin testaamaan stressitekijöiden vaikutusta pohjaeläinten yhteisörakenteeseen. Yhtä taksonia lukuun ottamatta kaikki taksonit reagoivat stressitekijöihin vedessä joko negatiivisesti tai positiivisesti. Etenkin harvinaisemmat ja vaativammat taksonit reagoivat stressitekijään herkästi. Osa tutkituista pohjaeläintaksoneista väheni lisääntyneiden ravinteiden ja sedimentin vuoksi, osa taksoneista sen sijaan hyötyi manipuloinnista. Esimerkiksi detritusta syövät taksonit hyötyivät ravinteiden ja sedimenttien määrän lisääntymisestä, sillä ne vaikuttavat detrituksen määrään positiivisesti, jolloin näillä taksoneilla on enemmän ravintoa syötävänä. Suurin osa taksoneista kuitenkin reagoi sedimenttien määrän lisääntymiseen negatiivisesti eli niiden yksilömäärät lähtivät laskuun, mikä vähentää biologista monimuotoisuutta virtavesissä. Sedimentti toimi stressitekijänä lähes kaikille taksoneille, kun taas ravinteiden lisääntyminen ei vaikuttanut yhtä negatiivisesti pohjaeläinten yhteisörakenteeseen. Tästä huolimatta myös

ravinteiden lisääntyminen aiheutti enemmän negatiivisia kuin positiivisia vaikutuksia. Tutkimus osoitti, että aluksi sedimenttien ja ravinteiden määrän kasvaminen lisäsi ympäristön heterogeenisyyttä, mutta tietyn rajan ylittyessä sedimenttien ja ravinteiden lisääntymisestä oli enemmän haittaa kuin hyötyä. Etenkin harvinaisemmat, vaativamman ympäristön pohjaeläintaksonit reagoivat herkemmin sedimenttien ja ravinteiden lisääntymiseen kuin yleisimmät taksonit.

3. Ilmaston lämpeneminen ja sen vaikutukset virtavesiin

3.1 Ilmaston lämpeneminen

Luonnollinen kasvihuoneilmiö mahdollistaa elämisen maapallolla. Ilmakehässä olevat kasvihuonekaasut eli vesihöyry (H_2O), hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), dityppioksidi (N_2O) ja otsoni (O_3), läpäisevät auringon säteilyn, mutta absorboivat maan pinnalta heijastunutta lämpöenergiaa takaisin maan pinnalle lämmittäen näin maanpintaa. Kasvihuonekaasujen vuoksi maapallon lämpötila on reilusti korkeampi, mikä mahdollistaa maapallolla elämisen (Philander, 2012). Voimistuneen kasvihuoneilmiön vuoksi maapallon keskilämpötila on noussut aiheuttaen muutoksia koko biosfäärissä.

Antropogeenisestä ilmastonmuutoksesta johtuva ilmaston lämpeneminen ilmenee muun muassa leudompina talvina, veden haihtumismäärän muuttumisena sekä virtausjärjestelmissä tapahtuvina muutoksina (Allan & Castillo, 2007). Pohjoisimmilla leveysasteilla ilman lämpötilan on ennustettu nousevan jyrkästi ilmaston lämpenemisen seurauksesta, ja sateiden määrä sekä ajoittuminen muuttuvat nykyisistä 2000-luvun loppuun mennessä, mikä johtaa muuttuneisiin lämpö- ja hydrologiajärjestelmiin vesistöissä (Mustonen et al., 2018). Virtavesien lämpötilat ovatkin jo nousseet viime vuosikymmenien aikana (Durance & Ormerod, 2009; Webb & Nobilis, 2007). Lämpenemisen seuraukset ovat todennäköisesti vakavimmat korkeimmilla leveysasteilla, joissa pienetkin lämpötilaerot voivat muuttaa lumen kertymisen ja sulamisen määrää ja ajoitusta (Carey et al., 2010), mikä vaikuttaa vesistöjen virtausjärjestelmiin (Bring et al., 2016) ja virtavesiekosysteemien toimintaan (Perkins et al., 2010; Woodward et al., 2010; Wrona et al., 2016). Pohjoisten alueiden on ennustettu kokevan huomattavia muutoksia lämpötilassa ja sademäärässä, mitkä johtavat lyhytkestoisempiin talviin, joiden aikana sateiden määrä vaihtelee enemmän ja sateet muuttuvat enemmän vedeksi (IPCC, 2014). Jo nyt pohjoisen pallonpuoliskon jokien virtaama on kasvanut lisääntyneiden sateiden vuoksi (Peterson et al., 2002; Vihma et al., 2016), kun taas useimmilla muilla alueilla virtaama ja sateet ovat vähentyneet ilmaston lämpenemisen aiheuttaman kuivuuden vaikutuksesta (Chessman, 2009).

Pohjoisen pallonpuoliskon virtavesille on ominaista erittäin vaihteleva, mutta kausittaisesti ennustettavissa oleva virtaama (Korhonen & Kuusisto, 2010; Veijalainen et al., 2010). Kausivaihteluita ohjaavat talven tasaiset pohjavesiolosuhteet, korkeat tulvahuiput

keväisin lumen sulamisen aikaan, yleensä matalat, mutta vaihtelevat kesävirrat ja toinen pieni huippu syksyllä, johtuen syksyn sateista ja vähentyneestä veden haihtumisesta (Mustonen et al., 2018). Jo pienikin muutos ilman lämpötilassa näillä leveysasteilla voi muuttaa olennaisesti lumipeitteen määrää ja sen alueellista jakaumaa, mikä johtaa huomattaviin eroihin valunnan ja virtaaman vuodenaikaisvaihteluissa (Barnett et al., 2005). Virtauksen kausiluonteisuus ja vuodenaikaisvaihtelut vaikuttavat vesieliöiden kasvuun, kehitykseen ja lisääntymiseen (Lytle & Poff, 2004; Power et al., 2008) ja virtavesissä tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa joessa elävien pohjaeläinten yhteisörakenteeseen (Poff et al., 1997).

3.2 Veden lämpötilan nousun vaikutus virtavesien hydrologiaan ja yhteisörakenteeseen

Ilmastonmuutoksesta johtuva ilman lämpötilan nousu ja muutokset sademäärässä ovat merkittävimpiä virtavesien toimintaa uhkaavista tekijöistä (Allan & Castillo, 2007). Veden lämpötila vaikuttaa organismien fysiologiaan ja bioenergetiikkaan (Friberg et al., 2009; Friberg & Winterbourn, 1996; Hogg & Williams, 1996; Rasmussen et al., 2011) eli yksilön kasvuun, kehitykseen ja entsyymitoimintaan sekä populaation tiheyteen ja levinneisyyteen (Domisch et al., 2013; Hill & Hawkins, 2014). Tämän vuoksi veden lämpötilassa tapahtuvat muutokset voivat aiheuttaa muutoksia yhteisörakenteessa ja -dynamiikassa. Esimerkiksi kylmään sopeutuneet lajit eivät enää olekaan optimaalisessa ympäristössään (Perkins et al., 2010; Woodward et al., 2010), jolloin taksonien ja populaatioiden dynamiikat muuttuvat johtuen ravintoverkossa tapahtuvasta energiankierron muutoksista (Lytle & Poff, 2004; Pyne & Poff, 2017; Wenger et al., 2011). Taksonit ovat myös sopeutuneet tiettyyn hydrologiseen järjestelmään, joten myös virtauksessa tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa virtavesistöjen yhteisörakenteisiin (Sala et al., 2000; Vörösmarty et al., 2010). Lämpimämmät talvet aiheuttavat maapallon pohjoisosissa jääolojen muutoksia ja täten virtaaman kasvua talvisin (Nilsson et al., 2015). Ilmaston lämpenemisen aiheuttamat muutokset sekä lämpö- että hydrologisissa järjestelmissä ovat jo vähentäneet huomattavasti biologista monimuotoisuutta virtavesissä, jopa enemmän kuin maa- tai meriekosysteemeissä (Sala et al., 2000; Vörösmarty et al., 2010).

Sekä hydrologisten järjestelmien että lämpöjärjestelmien odotetaan muuttuvan Suomessa merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjen lisääntyessä (Korhonen & Kuusisto, 2010; Veijalainen et al., 2010). Mustosen ym. (2018) tulokset viittaavat siihen, että lämpötilan ja virtausjärjestelmien muutokset todennäköisesti muuttavat merkittävästi boreaalisten

virtavesien pohjaeläinten yhteisörakennetta ja lajien ennustetaan siirtyvän pohjoisempaan vasteena ilmaston lämpenemiselle (Pereira et al., 2010). Mustosen ym. (2018) mukaan ilman lämpötila oli tärkein ennustaja nykyisten virtavesien pohjaeläinten yhteisörakenteelle. Taksonomisen rikkauden odotettiin kasvavan eniten pohjoisimmilla alueilla Suomessa, sillä ääriolosuhteisiin on sopeutunut vähemmän taksoneita kuin esimerkiksi keskilämpöisiin vesiin. Toisaalta kylmään sopeutuneiden taksonien määrän odotettiin vähenevän ja joidenkin taksonien jopa häviävän paikallisesti liian lämpimiksi muuttuvissa olosuhteissa, kun taas lämpimään veteen sopeutuneiden lajien odotettiin laajentavan kantojaan pohjoiseen päin (Durance & Ormerod, 2007; Hickling et al., 2006).

Piggottin ym. (2015) mukaan veden lämpötilan kohoaminen vähensi vesistön pohjaeläinten kokonaismäärää ja EPT-rikkautta, pois lukien muutamat poikkeukselliset taksonit, jotka eivät reagoineet veden lämpötilan muutoksiin tai hyötyivät lämpötilan noususta. EPT rikkausindeksi arvioi veden laatua kolmen suuren, veden pilaantumista huonosti sietävän hyönteislahkon suhteellisen runsauden perusteella. EPT rikkausindeksi voidaan ilmaista kyseisten herkkien lahkojen (E= Ephemeroptera, P= Plecoptera, T= Trichoptera) prosenttiosuutena taksonien kokonaislukumäärästä. Kohonnut lämpötila vaikutti myös vesistön pohjaeläinten eliöyhteisön kokorakenteeseen vähentämällä sekä keskikokoisten (1 – 5 mm) että suurikokoisten (> 5 mm) selkärangattomien määrää.

Ilmaston lämpenemisen vaikutus virtavesiin on hyvin paikkakohtaista. Virtavesien lämpötila voi vaihdella paljon, riippuen muun muassa vesistön koosta, kasvillisuudesta ja latvuston peittävydestä, pohjaveden osuudesta vesistössä ja vesistön alkuperäisestä lämpötilasta (Mustonen et al., 2018). Kaikki edellä mainitut ominaisuudet vaikuttavat virtavesistön haavoittuvuuteen ilmaston lämmetessä. Allanin & Castillon (2007) mukaan vesiekosysteemi on kaikkein haavoittuvaisimmillaan, kun se sisältää harvinaisen elinympäristön, jossa elää paljon endeemisiä lajeja ja taksoneita.

4. Ilmastonmuutoksen ja maatalouden yhteisvaikutus

4.1 Lämpötilan nousun, ravinteiden rikastumisen ja hienon sedimentin yhteisvaikutus virtavesiin

Piggott ym. (2015) manipuloivat pohjaeläinten elinympäristöä virtavesistössä lisäämällä ravinteiden ja hienon sedimentin määrää. Lisäksi tutkimuksessa veden lämpötilaa nostettiin 0 – 6 ° C ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Tutkimuksessa simuloitiin antropogeenisen ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja tarkoituksena oli selvittää, kuinka pohjaan kasautunut hieno sedimentti ja ravinteiden lisääntyminen vaikuttavat vesistön pohjaeläimiin ja kuinka paljon lämpenevä ilmasto vaikuttaa näiden stressitekijöiden vaikutuksiin. Ravinteiden määrän lisääminen simuloi maataloudesta tulevan orgaanisen aineksen valuntaa ja sedimenttien lisääminen maaperän eroosiota. Lämpötilan nostaminen simuloi ilmaston lämpenemisen vaikutuksia. Tutkimuksessa oletettiin, että ilmaston lämpeneminen todennäköisesti muuttaa jo olemassa olevien stressitekijöiden eli ravinteiden ja sedimenttien ekologisia vaikutuksia vesistöissä.

Piggott et al. (2015) oletivat muun muassa, että yksinomaan ravinteiden lisääntyminen vesistössä aiheuttaa positiivisia vastereaktioita pohjaeläimissä, kun taas sedimentti aiheuttaa negatiivisia reaktioita ja toimii kaikista voimakkaimpana stressin aiheuttajana. Kohonneen lämpötilan oletettiin aiheuttavan lähinnä negatiivisia vaikutuksia eliöstölle. Vaikutuksia ennustettiin näkyvän eliöyhteisön koostumuksessa ja tutkimukseen valittiin taksonit, jotka sietävät hyvin ravinnepitoisuuksien, sedimenttien tai lämpötilan nousua ympäristössä, jotta voidaan tutkia niiden yhteisvaikutusta. Tutkimuksen hypoteeseissa ennustettiin myös muutoksia pohjaeläinten käyttäytymisessä vasteena stressitekijöille ja pienemmän ruumiinkoon yleistymistä eliöyhteisössä lämpötilan noustessa. Vaikka lämpötilan kohoamisen ja muiden stressitekijöiden yhteisvaikutuksesta on vain vähän tutkimustietoa, Piggott ym. (2015) ennustivat, että lisätyn sedimentin negatiivinen vaikutus voi pahentua synergisesti korotetun lämpötilan vaikutuksesta. Pohjaeläinten yhteisötason reaktioiden ennustettiin olevan vähemmän alttiita stressitekijöiden yhteisvaikutukselle kuin populaatiotason reaktioiden, sillä taksonien vuorovaikutus voi heikentyä stressitekijöiden vaikutuksesta, mikä vaikuttaa ensisijaisesti tiettyjen taksonien toimintaan.

Jokainen Piggottin ym. (2015) manipuloima stressitekijä aiheutti erilaisia vastereaktioita pohjaeläimissä. Osa reaktioista oli negatiivisia, kuten esimerkiksi taksonin yksilömäärän väheneminen, tai positiivisia, kuten esimerkiksi detritusta ravintonaan käyttävien pohjaeläintaksonien yksilömäärän kasvu vasteena jonkin stressitekijän läsnäololle. Tutkimuksessa havaittiin myös stressitekijöiden yhteisvaikutuksia, jotka olivat usein joko additiivisia tai antagonistisia. Kohonnut lämpötila esimerkiksi aiheutti herkemmin tai voimakkaammin negatiivisia stressireaktioita pohjaeläimissä, jos ne olivat altistuneet jo toiselle stressitekijälle, kuten esimerkiksi sedimentille. Toisaalta lämpötila korosti myös positiivisia vaikutuksia pohjaeläimissä, esimerkiksi ravinteiden lisääminen vesistöön aiheutti joissain pohjaeläintaksoneissa positiivisia vasteita, joita lämpötila korosti entisestään. Tutkimuksen mukaan lämpötila saattoi jopa vähentää ravinteiden negatiivisia vaikutuksia. Lämpötila siis korosti tässä tutkimuksessa muiden stressitekijöiden aiheuttamia vasteita pohjaeläimissä.

Piggottin ym. (2015) mukaan etenkin maatalousalueilla sijaitsevilla virtavesistöillä, joihin sedimenttejä joutuu paljon maaperän lisääntyneen eroosion myötä, hienon sedimentin negatiiviset vaikutukset olivat voimakkaampia korkeammissa lämpötiloissa. Tämä tutkimustulos viittaa siihen, että ne joet, joihin suuret sedimenttipitoisuudet jo vaikuttavat, saattavat edelleenkin heikentyä ilmaston lämpenemisen seurauksena. Lämpötila, jossa näitä muutoksia tapahtuu, riippuu sedimenttien ohella ravinteiden määrästä vesistössä. Jos ravinteita on runsaasti vesistössä, stressitekijät kumuloituvat jo alhaisemmissakin lämpötiloissa. Jos taas vesistössä on vähemmän ravinteita ja hienoja sedimenttejä, ei lämpötilan nousu vaikuta yhtä voimakkaasti.

4.2 Tutkimukset ilmastonmuutoksen ja maatalouden vaikutuksista virtavesiin

Mustosen ym. tutkimuksessa (2018) selvisi erilaisten mallinnusten avulla, että boreaalisten virtavesistöjen pohjaeläinten kokoonpanoon vaikuttaa vahvasti veden lämpötila. Toisaalta kyseisen tutkimuksen mukaan pohjaeläinten kokoonpanoon vaikuttavat vahvasti myös virtavesiekosysteemeille ominaiset virtaaman vaihtelut ja kausiluontoisuus. Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että virtavesien ja etenkin latvapurojen suojaamiseksi ilmastonmuutokselta tarvitaan kiireellisiä suojelutoimia, varsinkin maankäytön, kuten esimerkiksi maatalouden, uhatessa jo monia niistä. Luonnollisten hydrologisten järjestelmien ja jokien varsilla olevien metsien ylläpitäminen tulisi olla suojelun ja hoidon painopiste, jotta latvapurot voitaisiin suojata liialliselta lämpenemiseltä (Thomas et al., 2016).

Ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset virtavesien lämpöjärjestelmässä ja hydrologiassa lisäävät todennäköisesti ravinnekuormituksen vaikutusta ja orgaanisen aineen kulkeutumista virtavesiin, mikä johtaa sekä suoriin että epäsuoriin vaikutuksiin virtavesissä eläviin organismeihin ja ekosysteemiprosesseihin (Wrona et al., 2006). Mustosen ym. (2018) mukaan mallintamalla näitä prosesseja voidaan laatia parempia ennusteita esimerkiksi lajien esiintymisensuhteen ja täten ymmärtää paremmin mekanismeja, joilla ilmastonmuutos vaikuttaa virtavesiekosysteemeihin.

Mustonen ym. (2018) eivät kuitenkaan tutkineet virtavesissä elävien selkärangattomien vastetta ilmastonmuutokselle talviolosuhteissa, mikä antaisi vielä enemmän tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista virtavesiekosysteemeihin. Talven olosuhteet, erityisesti jäädynamiikka, todennäköisesti kohtaavat muutoksia muuttuvien talvisateiden ja lämpimämpien sääolosuhteiden vuoksi. Sateet tulevat todennäköisesti enemmän vetenä ja ilman keskilämpötila nousee, mikä muuttaa lumen ja jään sulamistodennäköisyyttä. Jäätä saattaa muodostua vähemmän ja virtaama sen myötä pysyy korkeammalla talvellakin, mikä vaikuttaa koko virtaekosysteemin toimintaan. Muuttuvien jääolosuhteiden vaikutuksia virtavesien selkärangattomiin on tutkittu tähän mennessä vähän, mutta on hyvin todennäköistä, että talven keston lyhenemisellä ja jääpeitteen laajuuden pienenemisellä on merkittäviä vaikutuksia selkärangattomiin, joista monille on kehittynyt fysiologisia tai käyttäytymiseen liittyviä sopeumia, joiden avulla ne voivat selviytyä boreaalisista talviolosuhteista (Olsson, 1981).

Piggottin ym. tutkimuksessa (2015) selvisi, että kohonnut lämpötila vähensi selkärangattomien kokonaismäärää ja toimi näin stressitekijänä vesistön pohjaeläimille. Kyseisen tutkimuksen mukaan kohonnut lämpötila muokkasi pohjaeläinyhteisön kokorakennetta vähentämällä sekä keskikokoisten (1 – 5 mm) että suurikokoisten (> 5 mm) selkärangattomien määriä muuttaen näin pohjaeläinyhteisön rakennetta ja sen toimintaa. Tulokset osoittivat sen, että pienempikokoiset selkärangattomat pärjäävät paremmin lämpenevissä olosuhteissa, mikä puoltaa lämpötila-koko teoriaa, jonka mukaan kylmemmässä ilmastossa elävien vaihtolämpöisten eliöiden ruumiin koko on yleensä suurempi kuin lämpimämmässä ilmastossa elävillä (temperature-size rule).

5. Pohdinta

Yritykset hallita ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja säilyttää nykyisessä tilassaan olevia virtaekosysteemejä todennäköisesti jäävät ihmisten aiheuttaman ekologisen muutoksen jalkoihin (Woodward et al., 2010). Tämä korostaa ennustavien mallien kehittämisen tärkeyttä, koska niiden avulla voidaan informoida valtioiden päätöksentekijöitä todennäköisistä ilmaston lämpenemisen aiheuttamista vaihtoehtoisista tulevaisuuden skenaarioista. Mustosen ym (2018) tutkimuksen tulokset sekä aiemmat tutkimustulokset (Finn et al., 2011; Strayer & Dudgeon, 2010) viittaavat siihen, että tarvitaan kiireellisiä suojelutoimia ilmaston lämpenemisen aiheuttamia muutoksia vastaan, etenkin jokien latvapurojen suojelemiseksi, varsinkin kun monia niistä uhkaa jo valuma-alueen maankäyttö ja siitä johtuvat stressitekijät.

Luonnollisten hydrologisten järjestelmien ja jokien varsilla olevien metsien ylläpidon tulisi olla ensisijainen suojelun ja hoidon painopistealue, jotta virtavedet voidaan suojata liialliselta auringon valolta ja näin ollen veden lämpötilan kohoamiselta (Thomas et al., 2016). Ilmaston aiheuttamat muutokset virtavesisysteemin lämpöjärjestelmissä sekä hydrologiassa lisäävät todennäköisesti ravinteiden ja sedimentin aiheuttamaa kuormitusta virtavesiin, mikä johtaa sekä suoriin että epäsuoriin vaikutuksiin vesistöissä eläviin eliöihin ja ekosysteemiprosesseihin (Wrona et al., 2006). Piggottin ym. (2015) tutkimuksessa todettiin, että veden lämpötilan kohotessa ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta, esimerkiksi ravinteiden ja hienon sedimentin vaikutukset virtavesistön toimintaan ja sen eliöstöön tulevat olemaan vakavampia. Ilmaston lämpenemisen aiheuttamat vahingot virtavesiekosysteemeille tulevat siis olemaan moniulotteisia ja vakavia.

Tutkimukset osoittavat yleisesti, että jokialueiden alkuperäisen kasvillisuuden raivaaminen peltoalueiksi aiheuttaa maaperän eroosion lisääntymistä ja kasvavaa hienojen sedimenttien kuormaa vesistössä. Tämä aiheuttaa enemmän negatiivisia vaikutuksia vesistöihin kuin pelkästään ravinteiden määrän lisääntyminen (Piggott et al., 2015). Ravinteiden määrän kasvu aiheuttaa enemmänkin positiivisia vaikutuksia vesistön toimintaan ja pohjaeläinyhteisöjen rakenteeseen (Piggott et al., 2015). Kuitenkin ravinteiden määrän lisääntyminen, hienojen sedimenttien määrän kasvaminen sekä lämpötilan nousu aiheuttavat yhteisvaikutuksena vesistöjen laadun huononemista nopeammin ja tehokkaammin kuin yksittäiset stressitekijät. Maatalousalueilla jokien varsilta raivataan ympäristön alkuperäistä kasvillisuutta peltoalueiden tieltä ja tästä johtuva kasvillisuuden ja puuston määrän väheneminen jokien varsilta lisää vesistöön pääsevän auringon valon määrää, mikä nostaa

veden lämpötilaa. Veden lämpötilan nousu aiheuttaa myös muiden stressitekijöiden vaikutusten kumuloitumista ja suurenemista (Piggott et al., 2015). Jokien varsilla olevaa kasvillisuutta ja puustoa olisikin hyvä suojella, jotta maaperän eroosion määrän lisääntymistä ja sitä kautta erilaisten maatalouden lannoitteiden, torjunta-aineiden, kemikaalien ja maa-aineksen pääsyä vesistöihin voitaisiin ehkäistä. Puista tippuvat lehdet ovat myös tärkeä ravinnonlähde virtavesien pohjaeläimille, ja jos puustoa harvennetaan tai kasvillisuus poistetaan kokonaan peltoalueen tieltä, jäävät monet pohjaeläintaksonit ilman ravintoa. Tämä taas tarkoittaa eliöyhteisön rakenteessa tapahtuvia muutoksia, mikä puolestaan köyhdyttää virtavesiekosysteemien biologista monimuotoisuutta.

Lämpenevä ilmasto on osoittautunut merkittäväksi uhaksi virtavesiekosysteemeille, etenkin niiden ollessa jo kuormittuneita maatalouden aiheuttamasta ravinteiden määrän lisääntymisestä ja hienon sedimentin kerääntymisestä. Ilmastomuutoksesta johtuva vesien lämpötilan nousu ajaa selkärangattomia kohti pohjoista, aiheuttaen näin muutoksia vesistöjen eliöyhteisöjen rakenteessa (Mustonen et al., 2018). Sekä vesi- että maaekosysteemien onkin ennustettu muuttuvan Suomessa merkittävästi lisääntyneiden kasvihuonepäästöjen ja ilmaston lämpenemisen seurauksena (Korhonen & Kuusisto, 2010; Veijalainen et al., 2010). Virtavesien lämpötilat ovatkin jo kohonneet viime vuosikymmenten aikana (Durance & Ormerod, 2009; Webb & Nobilis, 2007) ja lämpötilan odotetaan kohoavan yhä enemmän ilmaston lämpenemisen myötä (Mustonen et al., 2018).

Ilmastomuutos on ja tulee olemaan elinaikamme suurin haaste ja sen hillitseminen on yksi tärkeimmistä tehtävistä koko globaalille yhteiskunnalle. Ilmastomuutoksen hillitseminen vaatii suuria muutoksia ihmisten arkipäiväisissä ratkaisuihin ja hiilidioksidipäästöjä vähentävien ratkaisujen löytämistä. Ellei lämpötilan nousua saada pysäytettyä, kaikki tuntemamme elinympäristöt tulevat muuttumaan tavalla tai toisella. Virtavesistöjä kuormittavien tekijöiden vaikutukset tulevat olemaan entistä voimakkaampia ilmaston lämpenemisen myötä ja esimerkiksi maatalouden vaikutukset virtavesiekosysteemeihin tulevat olemaan entistä vahingollisempia.

Lähteet

- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream ecology: structure and function of running waters*. Springer Science & Business Media.
- Barbour, M. T., Bierwagen, B. G., Hamilton, A. T., & Aumen, N. G. (2010). Climate change and biological indicators: detection, attribution, and management implications for aquatic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(4), 1349–1353.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309.
- Bring, A., Fedorova, I., Dibike, Y., Hinzman, L., Mård, J., Mernild, S. H., Prowse, T., Semenova, O., Stuefer, S. L., & Woo, M.-K. (2016). Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(3), 621–649.
- Brown, L. E., Aspray, K. L., Ledger, M. E., Mainstone, C., Palmer, S. M., Wilkes, M., & Holden, J. (2019). Sediment deposition from eroding peatlands alters headwater invertebrate biodiversity. *Global Change Biology*, 25(2), 602–619.
- Carey, S. K., Tetzlaff, D., Seibert, J., Soulsby, C., Buttle, J., Laudon, H., McDonnell, J., McGuire, K., Caissie, D., Shanley, J., & others. (2010). Inter-comparison of hydro-climatic regimes across northern catchments: Synchronicity, resistance and resilience. *Hydrological Processes*, 24(24), 3591–3602.
- Chessman, B. C. (2009). Climatic changes and 13-year trends in stream macroinvertebrate assemblages in New South Wales, Australia. *Global Change Biology*, 15(11), 2791–2802.
- Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C., Likens, G. E., & others. (2009). Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 323(5917), 1014–1015.
- Domisch, S., Araújo, M. B., Bonada, N., Pauls, S. U., Jähnig, S. C., & Haase, P. (2013). Modelling distribution in European stream macroinvertebrates under future climates. *Global Change Biology*, 19(3), 752–762.
- Durance, I., & Ormerod, S. J. (2007). Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. *Global Change Biology*, 13(5), 942–957.
- Durance, I., & Ormerod, S. J. (2009). Trends in water quality and discharge confound long-term warming effects on river macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 54(2), 388–405.
- Feld, C. K., Birk, S., Bradley, D. C., Hering, D., Kail, J., Marzin, A., Melcher, A., Nemitz, D., Pedersen, M. L., Pletterbauer, F., & others. (2011). From natural to degraded rivers and back again: a test of restoration ecology theory and practice. In *Advances in ecological research* (Vol. 44, pp. 119–209). Elsevier.

- Finlay, J. C., Small, G. E., & Sterner, R. W. (2013). Human influences on nitrogen removal in lakes. *Science*, 342(6155), 247–250.
- Finn, D. S., Bonada, N., Múrria, C., & Hughes, J. M. (2011). Small but mighty: headwaters are vital to stream network biodiversity at two levels of organization. *Journal of the North American Benthological Society*, 30(4), 963–980.
- Friberg, N., Bonada, N., Bradley, D. C., Dunbar, M. J., Edwards, F. K., Grey, J., Hayes, R. B., Hildrew, A. G., Lamouroux, N., Trimmer, M., & others. (2011). Biomonitoring of human impacts in freshwater ecosystems: the good, the bad and the ugly. In *Advances in ecological research* (Vol. 44, pp. 1–68). Elsevier.
- Friberg, N., Dybkjaer, J. B., Olafsson, J. S., Gislason, G. M., Larsen, S. E., & Lauridsen, T. L. (2009). Relationships between structure and function in streams contrasting in temperature. *Freshwater Biology*, 54(10), 2051–2068.
- Friberg, N., & Winterbourn, M. J. (1996). Interactions between riparian leaves and algal/microbial activity in streams. *Hydrobiologia*, 341(1), 51–56.
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R., & Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*, 12(3), 450–455.
- Hill, R. A., & Hawkins, C. P. (2014). Using modelled stream temperatures to predict macro-spatial patterns of stream invertebrate biodiversity. *Freshwater Biology*, 59(12), 2632–2644.
- Hladyz, S., Åbjörnsson, K., Chauvet, E., Dobson, M., Eloise, A., Ferreira, V., Fleituch, T., Gessner, M. O., Giller, P. S., Gulis, V., & others. (2011). Stream ecosystem functioning in an agricultural landscape: the importance of terrestrial–aquatic linkages. In *Advances in ecological research* (Vol. 44, pp. 211–276). Elsevier.
- Hogg, I. D., & Williams, D. D. (1996). Response of stream invertebrates to a global-warming thermal regime: An ecosystem-level manipulation. *Ecology*, 77(2), 395–407.
- IPCC (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Korhonen, J., & Kuusisto, E. (2010). Long-term changes in the discharge regime in Finland. *Hydrology Research*, 41(3–4), 253–268.
- Lytle, D. A., & Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 94–100.
- Matthaei, C. D., Piggott, J. J., & Townsend, C. R. (2010). Multiple stressors in agricultural streams: interactions among sediment addition, nutrient enrichment and water abstraction. *Journal of Applied Ecology*, 47(3), 639–649.
- Moore, M. V., Pace, M. L., Mather, J. R., Murdoch, P. S., Howarth, R. W., Folt, C. L., Chen, C. Y., Hemond, H. F., Flebbe, P. A., & Driscoll, C. T. (1997). Potential effects of climate change on freshwater ecosystems of the New England/Mid-Atlantic Region. *Hydrological Processes*, 11(8), 925–947. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19970630\)11:8<925::aid-hyp512>3.0.co;2-x](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19970630)11:8<925::aid-hyp512>3.0.co;2-x)

- Mulder, C., Boit, A., Bonkowski, M., de Ruiter, P. C., Mancinelli, G., der Heijden, M. G. A., van Wijnen, H. J., Vonk, J. A., & Rutgers, M. (2011). A belowground perspective on Dutch agroecosystems: how soil organisms interact to support ecosystem services. In *Advances in ecological research* (Vol. 44, pp. 277–357). Elsevier.
- Mustonen, K.-R., Mykrä, H., Marttila, H., Sarremejane, R., Veijalainen, N., Sippel, K., Muotka, T., & Hawkins, C. P. (2018). Thermal and hydrologic responses to climate change predict marked alterations in boreal stream invertebrate assemblages. *Global Change Biology*, 24(6), 2434–2446.
- Nilsson, C., Polvi, L. E., & Lind, L. (2015). Extreme events in streams and rivers in arctic and subarctic regions in an uncertain future. *Freshwater Biology*, 60(12), 2535–2546.
- Niyogi, D. K., Koren, M., Arbuckle, C. J., & Townsend, C. R. (2007). Stream communities along a catchment land-use gradient: subsidy-stress responses to pastoral development. *Environmental Management*, 39(2), 213–225.
- Olsson, T. I. (1981). Overwintering of benthic macroinvertebrates in ice and frozen sediment in a North Swedish river. *Ecography*, 4(3), 161–166.
- Pereira, H. M., Leadley, P. W., Proença, V., Alkemade, R., Scharlemann, J. P. W., Fernandez-Manjarrés, J. F., Araújo, M. B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W. W. L., & others. (2010). Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science*, 330(6010), 1496–1501.
- Perkins, D. M., Reiss, J., Yvon-Durocher, G., & Woodward, G. (2010). Global change and food webs in running waters. *Hydrobiologia*, 657(1), 181–198.
- Peterson, B. J., Holmes, R. M., McClelland, J. W., Vörösmarty, C. J., Lammers, R. B., Shiklomanov, A. I., Shiklomanov, I. A., & Rahmstorf, S. (2002). Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, 298(5601), 2171–2173.
- Philander, S. G. (2012). *Encyclopedia of Global Warming and Climate Change, Second Edition.: Vol. 2nd ed.* SAGE Publications, Inc. <http://pc124152.oulu.fi:8080/login?url=>
- Piggott, Jeremy J, Lange, K., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2012). Multiple stressors in agricultural streams: a mesocosm study of interactions among raised water temperature, sediment addition and nutrient enrichment. *PloS One*, 7(11), e49873.
- Piggott, J.J., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2015). Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics. *Global Change Biology*, 21(5), 1887–1906. <https://doi.org/10.1111/gcb.12861>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769–784.
- Power, M. E., Parker, M. S., & Dietrich, W. E. (2008). Seasonal reassembly of a river food web: floods, droughts, and impacts of fish. *Ecological Monographs*, 78(2), 263–282.
- Pyne, M. I., & Poff, N. L. (2017). Vulnerability of stream community composition and function to projected thermal warming and hydrologic change across ecoregions in the western United States. *Global Change Biology*, 23(1), 77–93.

- Rasmussen, J. J., Baattrup-Pedersen, A., Riis, T., & Friberg, N. (2011). Stream ecosystem properties and processes along a temperature gradient. *Aquatic Ecology*, 45(2), 231–242.
- Ryan, P. A., & Ryan, A. P. (2006). Impacts of global warming on New Zealand freshwater organisms: a preview and review. *New Zealand Natural Sciences*, 31, 43.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L. F., Jackson, R. B., Kinzig, A., & others. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770–1774.
- Smith, V. H., Joye, S. B., & Howarth, R. W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51(1part2), 351–355.
- Strayer, D. L., & Dudgeon, D. (2010). Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1), 344–358.
- Thomas, S. M., Griffiths, S. W., & Ormerod, S. J. (2016). Beyond cool: adapting upland streams for climate change using riparian woodlands. *Global Change Biology*, 22(1), 310–324.
- Townsend, C. R., Uhlmann, S. S., & Matthaei, C. D. (2008). Individual and combined responses of stream ecosystems to multiple stressors. *Journal of Applied Ecology*, 45(6), 1810–1819.
- Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehviläinen, B., & Käyhkö, J. (2010). National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology*, 391(3–4), 333–350.
- Vihma, T., Screen, J., Tjernström, M., Newton, B., Zhang, X., Popova, V., Deser, C., Holland, M., & Prowse, T. (2016). The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(3), 586–620.
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & others. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561.
- Wagenhoff, A., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2012). Macroinvertebrate responses along broad stressor gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients: a stream mesocosm experiment. *Journal of Applied Ecology*, 49(4), 892–902.
- Wagenhoff, A., Townsend, C. R., Phillips, N., & Matthaei, C. D. (2011). Subsidy-stress and multiple-stressor effects along gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients in a regional set of streams and rivers. *Freshwater Biology*, 56(9), 1916–1936.
- Webb, B. W., & Nobilis, F. (2007). Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 74–85.
- Wenger, S. J., Isaak, D. J., Luce, C. H., Neville, H. M., Fausch, K. D., Dunham, J. B., Dauwalter, D. C., Young, M. K., Elsner, M. M., Rieman, B. E., & others. (2011). Flow regime, temperature, and biotic interactions drive differential declines of trout species under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(34), 14175–14180.

- Woodward, G., Dybkjaer, J. B., Ólafsson, J. S., Gíslason, G. M., Hannesdóttir, E. R., & Friberg, N. (2010). Sentinel systems on the razor's edge: effects of warming on Arctic geothermal stream ecosystems. *Global Change Biology*, 16(7), 1979–1991.
- Woodward, G., Gessner, M. O., Giller, P. S., Gulis, V., Hladyz, S., Lecerf, A., Malmqvist, B., McKie, B. G., Tiegs, S. D., Cariss, H., & others. (2012). Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning. *Science*, 336(6087), 1438–1440.
- Wrona, F. J., Johansson, M., Culp, J. M., Jenkins, A., Mård, J., Myers-Smith, I. H., Prowse, T. D., Vincent, W. F., & Wookey, P. A. (2016). Transitions in Arctic ecosystems: Ecological implications of a changing hydrological regime. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(3), 650–674.
- Wrona, F. J., Prowse, T. D., Reist, J. D., Hobbie, J. E., Lévesque, L. M. J., & Vincent, W. F. (2006). Climate change effects on aquatic biota, ecosystem structure and function. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35(7), 359–369.